

## PERBANDINGAN SISTEM PENGONTROLAN PID KONVENSIONAL DENGAN PENGONTROLAN CMAC, *FUZZY LOGIC* DAN ANN PADA *WATER LEVEL PRESSURIZER*

Restu Maerani, Syaiful Bakhri  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

### ABSTRAK

**PEMBANDINGAN SISTEM PENGONTROLAN PID KONVENSIONAL DENGAN PENGONTROLAN CMAC, *FUZZY LOGIC* DAN ANN PADA *WATER LEVEL PRESSURIZER*.** Sistem pengontrolan berbagai parameter dalam pengoperasian di *pressurizer* sangat diperlukan untuk menjamin keselamatan reaktor daya PWR. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan metode pengontrolan yang paling tepat, untuk mendapatkan tingkat keselamatan yang tinggi. Pengontrolan yang paling mudah dan paling banyak digunakan adalah PID *controller* karena struktur yang kuat dan sederhana. Sedangkan pengontrolan lainnya yang juga bisa digunakan adalah CMAC (*Cerebellar Model Articulation Controller*), Fuzzy Logic serta ANN (*Artificial Neural Networks*) yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Studi ini mengkaji berbagai paradigma pengontrolan ini sehingga diharapkan dapat dipilih model sistem pengontrolan yang lebih tepat, akurat serta memiliki sistem yang dapat mendukung kinerja *pressurizer* dengan baik. Sedangkan untuk lebih memberikan gambaran detil, kajian dikhususkan pada keempat pengontrolan tersebut dalam aplikasinya dipengukuran *water level pressurizer* pada reaktor daya tipe PWR.

**Kata Kunci :** *Pressurizer*, PID, CMAC, ANN, *Fuzzy Logic*

### ABSTRACT

**COMPARISON BETWEEN THE CONVENTIONAL PID CONTROL SYSTEM AND CMAC, *FUZZY LOGIC* AND ANN CONTROL SYSTEM FOR *PRESSURIZER WATER LEVEL*.**

Controlling systems various parameters in the operation in the *pressurizer* is necessary to ensure the safety of PWR power reactor. Various studies have been conducted to obtain the most appropriate control methods, to obtain a high level of safety. Control of the easiest and most widely used is a PID controller for robust and simple structure. While other control that can also be used is CMAC (*Cerebellar Model Articulation Controller*), Fuzzy Logic and ANN (*Artificial Neural Networks*), each of which has advantages and disadvantages. This study examines the control paradigm is expected to be selected so that the control system is more precise, accurate and have a system that can support good performance with the *pressurizer*. Meanwhile, to further provide a detailed overview, studies devoted to the application of the four systems for controlling water level in the *pressurizer* power reactors type PWR.

**Keywords :** *Pressurizer*, PID, CMAC, ANN, *Fuzzy Logic*

### PENDAHULUAN

*Pressurizer* merupakan komponen penting yang menjaga kestabilan tekanan dari panas yang dihasilkan oleh bejana reaktor agar dapat digunakan pada *steam generator* dengan porsi yang tepat. *Pressurizer* memiliki elemen air dan uap, dan untuk menjaga keseimbangan air dan uap tersebut maka dibutuhkan pengontrolan

untuk mengendalikan *sprayer*, *heater*, katup otomatis dan sistem *relief*. Sistem pengontrolan ini berperan dalam menjaga kestabilan tekanan pada *pressurizer* dengan mengaktifkan komponen *sprayer* apabila tekanan *pressurizer* terlalu tinggi, ataupun sebaliknya mengaktifkan *heater* apabila tekanan menurun.

Untuk mengatur mekanisme kerja *pressurizer* ini sesuai dengan permintaan daya operasi reaktor dibutuhkanlah sebuah sistem pengontrolan. Salah satu pengontrolan yang umum digunakan adalah menggunakan pengontrolan PID (*Proportional Integral Derivative*). Pengontrol PID terdiri dari tiga komponen, yaitu komponen Proporsional (P), komponen Integral (I) dan komponen Derivatif (D). Pengontrol PID akan menghasilkan aksi kontrol dengan membandingkan kesalahan atau *error* yang merupakan selisih dari *process variable* dan *set point* sebagai masukan. Teknik pengontrolan lainnya, yaitu dengan menggunakan *Fuzzy Logic*, memiliki cara yang lebih sederhana dalam memberikan keputusan seperti halnya manusia berpikir, dengan menafsirkan data dan mencari solusi yang lebih tepat. Beberapa riset juga berupaya mencari teknik pengontrolan terbaik seperti: pengontrolan level air dengan menggunakan *Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)*, dan penggunaan *Artificial Neural Networks (ANNs)* dalam pemodelan untuk sistem pemetaan pada reaktor PWR.

Dari berbagai metode pengontrolan yang ada, perlu dilakukan pengkajian lebih dalam untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang unjuk kerja dari pengontrolan yang disebutkan di atas. Dari hasil pengkajian makalah ini akan dibandingkan tentang perbandingan sistem pengontrolan *pressurizer* dari yang didapat di referensi, seperti pengontrolan menggunakan PID konvensional, dengan dukungan *CMAC (Cerebellar Model Articulation Controller)*, *Artificial Neural Network (ANN)* dan juga menggunakan

pengontrolan *Fuzzy Logic*. Pengkajian ini juga diharapkan memberikan kontribusi positif meningkatkan pemahaman tentang berbagai metode kontrol yang ada, sekaligus rekomendasi yang lebih obyektif tentang metode *pressurizer* pengontrolan terbaik saat implementasi pembangunan reaktor daya PWR nantinya.

## TEORI

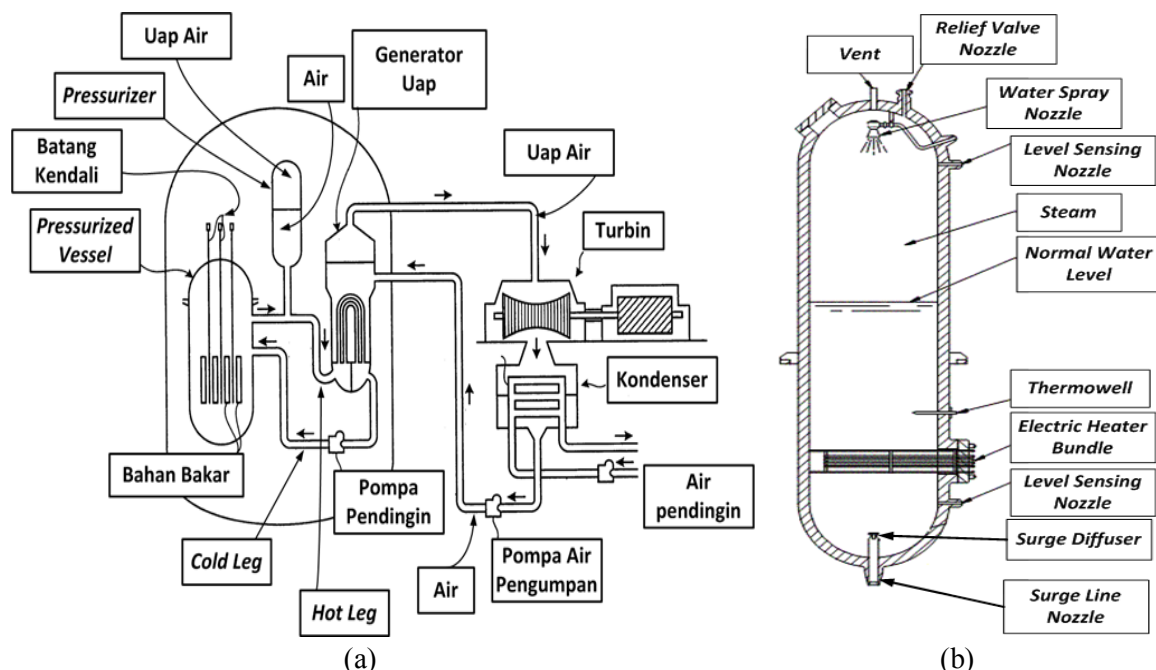
### ***Gambaran Singkat Pressurizer dan Pengontrolan Level Permukaan Airnya***

Pressurizer merupakan sebuah tabung penjaga kesetimbangan panas yang datang dari bejana reaktor agar nantinya panas tersebut dapat dipergunakan pada steam generator untuk memanaskan air yang akan dipergunakan sebagai penggerak turbin. Posisi pressurizer di tipikal sebuah PWR terlihat di Gambar 1. Di dalam kungkungan pressurizer itu sendiri terdapat dua bagian yang terisi oleh air sedangkan bagian lainnya merupakan ruang untuk uap panas. Pada kondisi kondisi *steady state* air yang berada dalam kondisi saturasi berkisar 60% dan selebihnya 40% adalah uap panas. Kemudian terdapat *sprayer* yang berfungsi untuk menjaga kestabilan dari uap tersebut agar tidak terlalu panas. Sedangkan apabila tekanan uap terus menurun maka *pressurizer* memiliki sistem pemanas cadangan, sehingga panas yang diteruskan ke *steam generator* selalu dalam kondisi stabil. Dengan kata lain, *pressurizer* sangat penting untuk menghindari *overpressure* sekaligus menjaga kestabilan panas yang dihasilkan dari teras reaktor agar air pendingin tidak mendidih. Dari sisi keselamatan, sistem *pressurizer* juga sebagai penghalang dari peristiwa *overpressure* agar radio nuklida tidak mencapai lingkungan.

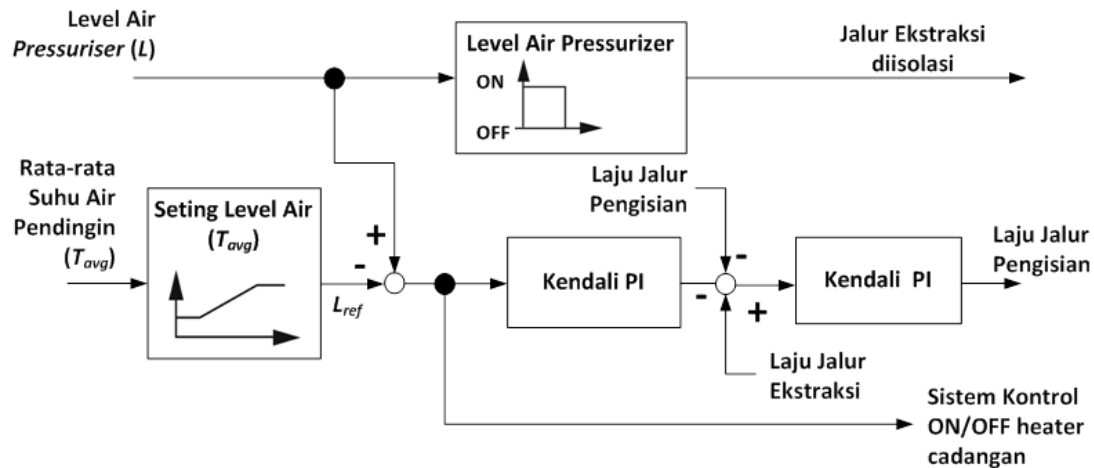
Gambar 1 mengilustrasikan posisi *pressurizer* berikut detail konstruksinya. Pada dasarnya sistem utama *pressurizer* terdiri dari beberapa komponen seperti *pressurizer vessel*, *surge line*, *electric immersion heaters* dan *spray system*. Sebagai catatan sistem *pressurizer* ini juga dilengkapi juga dengan beberapa katup (tidak nampak dalam gambar), seperti *safety valves*, *isolation valves* dan *relief valves* serta *pressurizer relief tank* sebagai pendukung sistem pengaman sekaligus kontrol. Gambar 1(b) juga menunjukkan *surge line* yang akan mengakomodasi dua jenis *surge* sekaligus yaitu *volume insurge*, yaitu saat masuknya air pendingin primer dan *out surge* saat keluarnya sejumlah volume air pendingin untuk mempertahankan temperatur pendingin pada *set point* tertentu seiring perubahan beban terhadap PWR. Dengan kata lain perubahan volume yang terjadi karena kontraksi dan ekspansi air

pendingin karena perubahan suhunya akan mempengaruhi level permukaan air sekaligus tekanan dari bagian gas di *pressurizer*.

Pada dasarnya level permukaan air di *pressurizer* pada tipikal paradigma kontrol PWR menjadi salah satu parameter seberapa banyak air pendingin primer yang tersimpan di untai primer reaktor. Pengontrolan level ini juga relatif sederhana dengan mengintegrasikannya pada pengaturan sistem pengisian air pendingin di kalang primer melalui level *chemical and volume control system* (CVCS). Jika level air *pressurizer* menurun melewati *set value* yang sudah ditetapkan sebelumnya maka sejumlah air ditambahkan, namun apabila meningkat maka sejumlah air harus dibuang dari sistem pendingin. Proses ini terjadi secara berterusan dengan pengontrolan seperti ditunjukkan di Gambar 2.



Gambar 1. (a) Posisi *pressurizer* pada rangkaian reaktor nuklir tipe PWR berikut (b) detail konstruksinya <sup>(1)</sup>



Gambar 2. Sistem pengontrolan level air pada *pressurizer* <sup>(2)</sup>

Gambar 2 menunjukkan sistem pengontrolan level di *pressurizer* PWR dengan tiga masukan kendali seperti masukan level air berikut level referensinya, laju pengisian dan laju ekstraksi alirannya. Sistem pengontrolan seperti terlihat di Gambar 2, juga dilengkapi sistem pengamanan dimana jika terjadi penurunan level air yang tajam, maka sistem isolasi akan menutup *pressurizer* sekaligus mematikan pemanas agar tidak terbakar.

Laju pengisian biasanya dilakukan dengan merubah sudut katup pengisian aliran agar level air bersesuaian dengan referensinya. Perlu dicatat bahwa referensi *set point* level air sangat tergantung dari perubahan suhu air rata-rata pendingin reaktor ( $T_{avg}$ ), baik itu dengan metode kontrol dengan perhitungan uap air yang konstan, suhu rata-rata air yang konstan maupun gabungan keduanya seperti yang banyak terdapat di Jepang. Jika suhu rerata pendingin naik  $T_{avg}$ , maka ia akan mengakibatkan ekspansi volume air yang akan menaikkan level, sebaliknya jika suhu rerata turun maka kontraksi akan menurunkan levelnya. Dengan kata lain,

ekspansi atau kontraksi pendingin primer yang dapat dipantau dari  $T_{avg}$  dan dimanfaatkan untuk pengontrolan. Jadi, filosofi pengontrolan yang sesuai ilustrasi di Gambar 2 adalah bagaimana mengontrol level air dengan mengikuti perubahan temperatur rata-rata pendingin reaktor sehingga beban kerja CVCS terhadap fluktuasi permintaan daya pembangkitan berkurang.

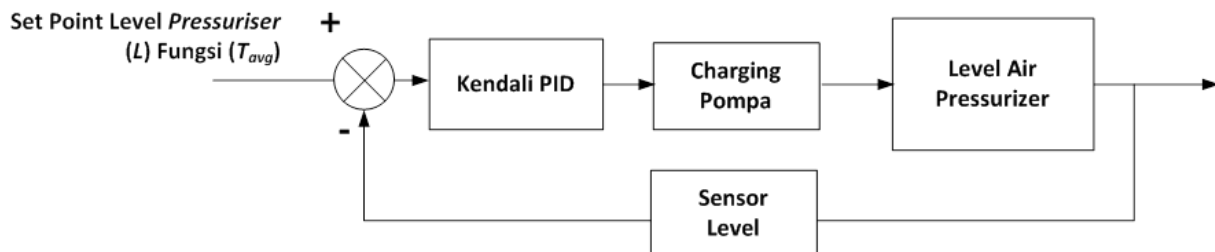
Walaupun suhu rerata mempengaruhi tekanan dan level air di *pressurizer*, namun pada kenyataannya sedikit sekali aksi pengontrolan yang dilakukan pada level dibandingkan dengan tekanannya walaupun pada kondisi transien. Karena itu maka kontrol level relatif tidak mempengaruhi sama sekali pengontrolan tekanan *pressurizer*. Namun, terlepas dari seberapa sering aksi beban pengontrolan dibutuhkan, sistem ini tetaplah membutuhkan metode kendali yang tepat akurat dan tepat untuk dipergunakan di PWR. Oleh karena itu dibagian selanjutnya berbagai riset tentang metode pengontrolan yang sudah pernah dilakukan akan dikaji serta dibandingkan.

### PID Controller Konvensional

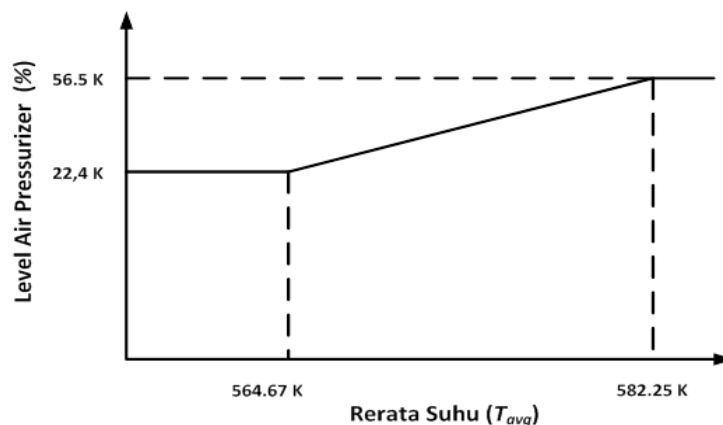
PID (*Proportional, Integral, Derivative*) adalah pengontrolan dengan unsur P, I dan D berupa model matematika dengan masukan  $Gain + Integral + Derivative$ <sup>(3)</sup>. PID merupakan pengontrolan konvensional, yang merupakan bentuk matematis yang sangat baik karena dapat mengubah *error* menjadi nol. Yaitu dengan menyamakan proses variabel sama dengan *set point* sehingga kestabilan pengontrolan dapat tercapai. Meskipun PID merupakan sistem pengontrolan yang paling unggul, namun ketiga parameter P, I dan D satu sama lain memiliki kekurangan dan kelebihan, dapat saling mempengaruhi dan dapat juga berdiri sendiri ataupun gabungan ketiganya sehingga mendapatkan sinyal keluaran untuk sistem yang diinginkan<sup>(4)</sup>, mengingat komponen dari sebuah kontroler merupakan gabungan dari detektor kesalahan serta penguat sebagai penggerak<sup>(5)</sup>.

Secara umum, blok diagram pengontrolan PID pada *pressurizer* ditunjukkan di Gambar 3. Perlu dicatat bahwa *set point* dari level *pressurizer* jika dihitung berdasarkan fungsi suhu salah satu contohnya ditunjukkan di Gambar 4 berikut ini.

Kendali perhitungan PID (algoritma) melibatkan 3 nilai konstan parameter yang dipisahkan dan terkadang disebut *three-time-control*: yaitu nilai *proportional*, *integral* dan *derivative*, yang dapat diketahui kapan waktunya. Nilai P dihasilkan dari nilai *error* yang masuk dalam sensor, kemudian nilai I merupakan akumulasi dari *error* sebelumnya, kemudian D akan memprediksi kesalahan selanjutnya. Seperti ditunjukkan di Gambar 2 dan Gambar 3, aksi pengontrolan ini yang paling sering digunakan dalam pengontrolan di *pressurizer* terutama untuk pengontrolan tekanan. Sedangkan untuk pengontrolan level,



Gambar 3. Diagram Pengontrolan *Pressurizer* dengan PI



Gambar 4. Contoh *set point* level *pressurizer* sebagai fungsi suhu rerata pendingin primer di PWR

aplikasi di PWR sebenarnya cukup dipenuhi dengan PI saja. Jika kendali proporsionalnya saja akan menghasilkan keluaran yang bersesuaian dengan nilai ralatnya, dan selanjutnya dikalikan dengan gain proporsional  $K_p$  untuk mendapatkan respon proporsionalnya. Sedangkan jika dikombinasikan dengan Integral (I) menjadi PI maka akan menghasilkan nilai yang proporsional tidak hanya terhadap *magnitude* ralatnya akan tetapi sampai seberapa lama ralatnya.

Untuk mendapatkan hasil  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang baik maka kombinasi P, I dan D harus dilakukan percobaan membuat diagram blok sistem dengan cara <sup>(6)</sup>:

1. Memahami sistem.
2. Mencari sistem dinamik dan persamaan diferensial.
3. Fungsi alih sistem.
4. Menentukan konstanta  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ .
5. Menggabungkan fungsi alih dengan aksi pengontrolan.
6. Menguji sistem dengan sinyal masukan pada fungsi alih.
7. Menggambar tanggapan sistem.

Definisi  $f_{PID}(t)$  sebagai hasil kendali *output*, sedangkan sebagai standar algoritma PID adalah:

$$f_{PID} = K_p \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \right) \quad (1)$$

dimana  $K_p$  adalah *gain proportional*,  $T_i$  adalah waktu integral,  $T_d$  adalah waktu derivatif,  $\varepsilon$  menunjukkan ralat ( $\varepsilon = \text{setpoint} - \text{variabel terukur}$ ), dan  $t$  adalah variabel waktu. Bentuk diskrit dari algoritma PID dapat didekati

dengan:

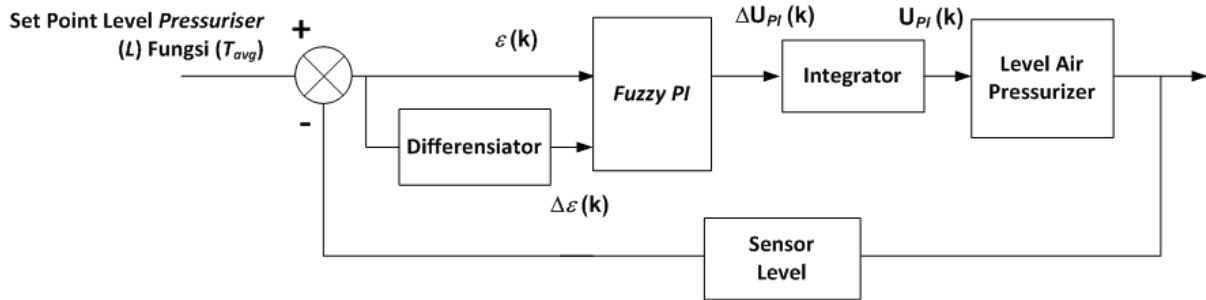
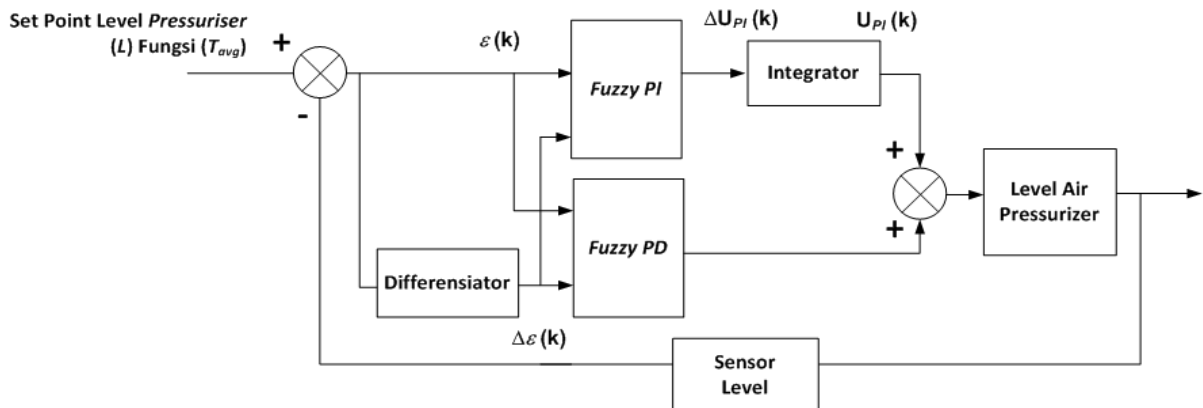
$$U_{PID}(k) = K_p \left( \varepsilon(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k \varepsilon(k) T_s + T_d \frac{\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)}{T_s} \right) \quad (2)$$

dimana  $T_s$  adalah periode *sampling* sedangkan  $k$  adalah langkahnya.

### Fuzzy Logic

Metode pengontrolan lainnya yang diteliti untuk aplikasi di pressurizer adalah *Fuzzy Logic*, yang merupakan pengembangan lebih lanjut dari logika *boolean*. Logika secara klasik menilai berdasarkan benar atau salah, hitam atau putih, 1 atau 0, maka pada logika *fuzzy* melihatnya dengan tingkat kebenaran. Logika *Fuzzy* dapat menempatkan suatu nilai diantara 0 dan 1, bisa menilai abu-abu diantara hitam dan putih<sup>(7)</sup>. Secara linguistik, konsep ini menyebutkan yang tidak pasti seperti "bisa" ataupun "boleh". Logika ini berhubungan dengan set *fuzzy* dan teori kemungkinan. Contoh dari pengembangan logika *fuzzy* yang diharapkan dari suatu komputer dapat melaksanakan pekerjaan manusia, dalam hal ini menggantikan pekerjaan seorang operator dengan meniru kecerdasan yang dimiliki manusia.

Logika *fuzzy* diharapkan dapat membuat keputusan seperti yang dilakukan manusia dengan menafsirkan data yang diberikan untuk kemudian dapat mencari solusi yang tepat. Oleh karena itu, tidak ada kebutuhan untuk membangun model matematis akurat dikendalikan objek ketika merancang model. Keuntungan menggunakan logika *fuzzy* karena desain yang lebih sederhana serta lebih mudah diterapkan.

Gambar. 5. Kombinasi logika *fuzzy* dengan kontrol PI<sup>(8)</sup>Gambar 6. Aplikasi logika *fuzzy* dengan kontrol PI dan PD<sup>(8)</sup>

Aplikasi logika *fuzzy* di pembangkit daya relatif cukup luas, namun masih terbatas dalam penelitian dan pemodelan. Beberapa penelitian mengkombinasikan kelebihan dan kekurangan logika *fuzzy* dengan pengontrolan konvensional seperti terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa logika *fuzzy* digunakan untuk mengatur secara dinamis parameter  $K_p$  sekaligus waktu integralnya  $T_i$  berdasarkan ralat atau *error* hasil pengukuran level dengan *set point* level air pendingin sebagai fungsi suhu pendingin. Aplikasi yang sama dari logika *fuzzy* juga diaplikasikan untuk mencari parameter waktu differential  $T_d$  yang diaplikasikan secara terpisah (PD) dan (PI), dan tidak sekaligus (PID) untuk menghindari kompleksitas perhitungan dan komputasi dimensi logika *fuzzy* yang terlalu besar.

Penelitian metoda ini sebenarnya diaplikasikan pada kontrol tekanan *pressurizer*, namun dapat juga diaplikasikan pada pengontrolan level permukaan air di *pressurizer* dengan sedikit penyesuaian.

#### CMAC ( Cerebellar Model Articulation Controller )

Penelitian lainnya menggunakan *Cerebellar Model Articulation Controller* (CMAC) sebagai salah satu pengontrolan cerdas karena diklaim prinsipnya yang meniru pola pikir manusia untuk dan dapat memberikan keputusan dengan respon yang cepat. Cepatnya respon yang ditunjukkan karena CMAC tidak menggunakan perhitungan numerik dalam menganalisis dinamika kontrol yang terjadi namun menggunakan metode *look up table* dengan membaca memori basis data tertentu<sup>(9)</sup>.

Penelitian ini juga menunjukkan hasil lebih baik dibanding PID terutama karena mampu memberikan pendekatan *non-linier* yang lebih baik. Jika digunakan untuk mengontrol level air pada reaktor nuklir, CMAC dapat digabungkan dengan PID konvensional seperti terlihat di Gambar 7.

Terlihat di Gambar 7, CMAC pada dasarnya adalah jaringan saraf tiruan yang memetakan relasi antara *input* dan *output* lewat *mode* pengalaman tertentu dengan aturan-aturan pembelajaran berdasarkan kondisi keluaran kendali. Dengan kata lain, aturan pembelajaran (*Learning Rule*) digunakan untuk menghasilkan ralat terkecil antara kendali PID dan keluaran CMAC.

#### Artificial Neural Network (ANNs)

Wutsqa (2006) dalam teorinya tentang ANN yang terbentuk dari pengembangan model matematika yang mensimulasikan teknologi intelegensi manusia dengan dasar-dasar berikut <sup>(9)</sup>.

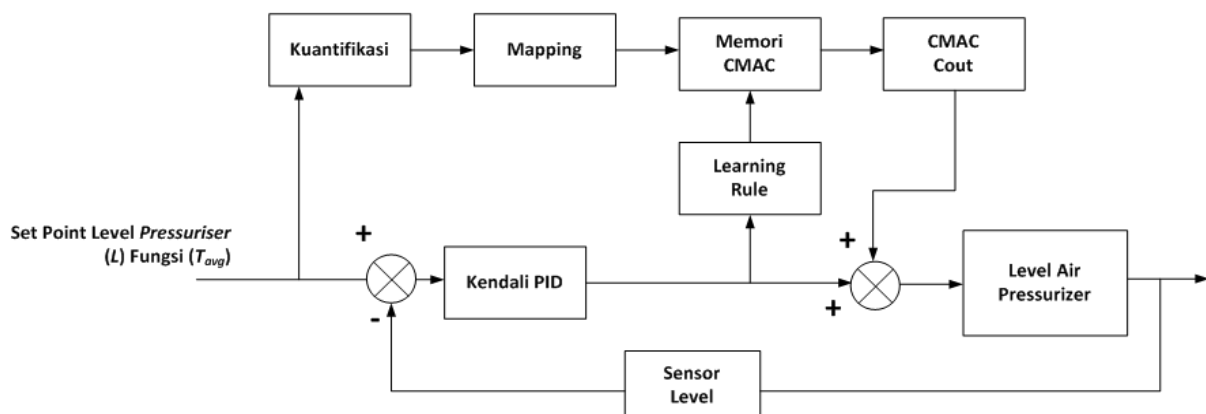
1. Proses informasi terjadi pada banyak elemen sederhana yang disebut neuron.
2. Sinyal-sinyal dikirim antar neuron melalui

*connection-links* (sinapsis).

3. Setiap sinapsis mempunyai bobot tertentu, tergantung tipe ANN.
4. Setiap neuron menggunakan fungsi aktivasi yang merupakan penjumlahan dari sinyal-sinyal input untuk menentukan sinyal-sinyal *output*.

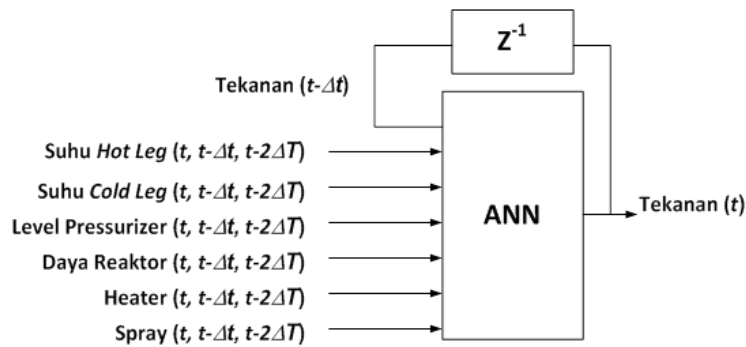
Dikatakan juga bahwa ANN merupakan model regresi non linear yang kompleksitas modelnya dapat diubah hanya pada satu lapisan *input* dan satu lapisan *output* ketika level kompleksitas tersebut dalam posisi rendah <sup>(9)</sup>. ANN bisa mengubah kompleksitas jaringan yang dapat mengakomodasi efek non-linear. Hal ini dilakukan dengan menambahkan satu atau lebih *hidden layer* pada jaringan.

ANN juga aplikasikan di *pressurizer* pembangkit daya PWR baik pada pemodelan tekanannya maupun kontrol levelnya. Gambar 8 mengilustrasikan model *pressurizer* dengan menggunakan berbagai masukan parameter data operasinya, seperti suhu baik di sisi *cold leg* maupun *hot leg*, level air, daya reaktor, *heater* dan *spray* sebagai fungsi waktu dan suhu. ANN *pressurizer* model ini diimplementasikan dengan memanfaatkan 8000 pola data latihan



Gambar.7. Struktur Penggabungan CMAC dengan PID



Gambar. 8. Arsitektur ANN pada model *pressurizer*<sup>(10)</sup>

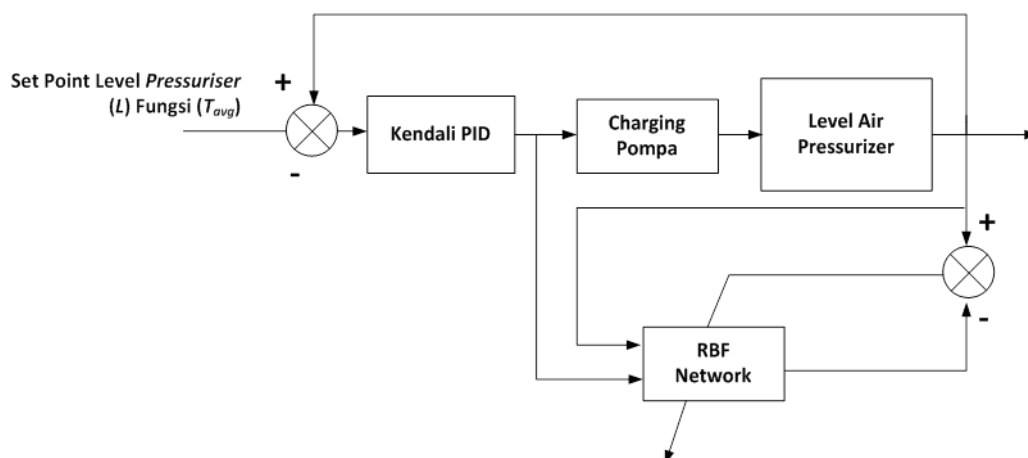
dari berbagai kasus, dengan arsitektur 19-13-1 (19 *input*, 13 *hidden layer* dan 1 *output*). Metoda latih yang digunakan adalah Conjugate Gradient Algorithm (CGA) yang mendasarkan iterasinya pada pola-pola gabungan sehingga pelatihan tidak harus dilakukan pada seluruh data. Metoda ini diklaim lebih cepat konvergen dibanding pelatihan dengan *backpropagation* konvensional dan menghemat sumber daya komputasi karena pelatihan tidak harus kontinu dilakukan. Sedangkan untuk aplikasi kontrol menggunakan ANN dijelaskan pada Gambar 9.

Gambar 9 mengilustrasikan salah satu aplikasi ANN pada pengontrolan level di PWR dengan menggunakan algoritma *Radial Basis Function* (RBF). Ide dasar dari aplikasi ANN sama dengan implementasi logika *fuzzy*

sebelumnya, yaitu bagaimana cara mengotomasi pemetaan perilaku PID dalam mengendalikan level *pressurizer* melalui penentuan parameter-parameternya secara lebih akurat dan kontinyu. Dengan kata lain pembebanan matriks pembelajarannya ditentukan dari perilaku keluaran sehingga didapat parameter persamaan proporsional, integral dan differensial. Dengan demikian, kesulitan PID dalam mengatasi berbagai kondisi operasi dapat diatasi dengan pembelajaran mandiri dari kondisi sebuah sistem dengan jaringan saraf tiruan ini.

## METODOLOGI

Dengan membandingkan model sistem pengontrolan PID, pengontrolan CMAC, *Fuzzy Logic* dan ANN yang ada pada makalah-makalah yang diambil dalam referensi daftar,

Gambar. 9. Metode pengontrolan level dengan ANN-RBF pada model *pressurizer*<sup>(11)</sup>

dicari masing-masing kelemahan dan kelebihan sistem pengontrolannya dengan me-*list*-kannya dalam bentuk tabel perbandingan. Selanjutnya dievaluasi dan dibahas dalam Bab Hasil dan Pembahasan, serta menarik kesimpulan tentang model sistem pengontrolan yang lebih tepat dan akurat untuk digunakan dalam pengontrolan *pressurizer*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perbandingan berbagai metoda pengontrolan yang sudah didiskusikan di bagian dasar teori ditunjukkan di Tabel 1. Perbandingan ini meliputi beberapa faktor dan parameter diantaranya kompleksitas perhitungan, respon terhadap gangguan, kemampuan analisis dinamis dan aplikasi kendalinya pada *water level pressurizer*.

Tabel 1 menunjukkan perbandingan beberapa metode pengontrolan *pressurizer* ditinjau dari beberapa aspek penting untuk implementasinya di pembangkit daya PWR. Dari berbagai referensi yang ada terlihat bahwa kontrol PID konvensional adalah metode yang satu-satunya telah diterapkan di *pressurizer* PWR dengan keterbatasannya yang ada. Hal ini mungkin karena keandalannya yang berdasarkan pada persamaan analitis numerik sederhana sehingga lebih mudah diimplementasikan pada perangkat keras berbasis kendali sistem digital maupun kendali sistem analog. Sebagai catatan algoritma PID sudah dapat diimplementasikan secara langsung pada sistem digital yang biasa dipakai di PWR baik pada *programmable logic controller* PLC maupun *field programmable gate array* FPGA.

Sedangkan berbagai tantangan yang ada biasanya dapat diatasi dengan *fine tuning* parameternya sehingga didapat performa terbaik dari sistem kontrol ini.

Terlepas dari kehandalan kendali PID pada aplikasi pengontrolan *pressurizer*, berbagai macam kendali lainnya terus dikembangkan untuk memperbaiki unjuk kerja yang ada. Namun, dari literatur yang ada sedikit sekali informasi yang menyebutkan aplikasinya secara mandiri. Baik logika *fuzzy*, maupun jaringan saraf tiruan atau ANN biasanya dikombinasikan untuk menunjang kinerja kontrol PID. Sebagai contoh, gabungan pengontrolan PID dengan ANN-RBF menghasilkan respon yang lebih cepat, mampu memulihkan stabilitas sistem dengan cepat, sekaligus tahan terhadap gangguan<sup>(1)</sup>. Hal yang sama juga ditunjukkan pada hasil penelitian terhadap kombinasi ANN-CMAC. Namun penelitian CMAC ini walaupun mengklaim respon waktu yang cepat terhadap dinamika masukan fungsi *step* namun respon ini tidak dapat dibedakan, seperti tampak pada grafik yang diberikan dengan masukan PID.

Berbeda dengan kombinasi pengontrolan PID dan ANN, kombinasi pengontrolan PID dan logika *fuzzy* lebih membutuhkan kehati-hatian dalam implementasinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelebihan dan kekurangan PID dan logika *fuzzy* bisa saling menghilangkan dan tidak memberikan peningkatan performa yang signifikan. Untuk mengatasi ini sebuah penelitian mengusulkan pengaturan kasar (*coarse adjustment*) dilakukan dulu oleh *fuzzy* kemudian diikuti dengan pengaturan kontrol secara halus (*fine adjustment*) dengan PID.

Tabel 1. Perbandingan beberapa metode pengontrolan level di *pressurizer*

Parameter Perbandingan	PID	FUZZY LOGIC	CMAC-ANN	RBF-ANN
<b>Respon waktu</b>	Kurang stabil apabila makin banyak masukan datanya. <i>Overshoot</i> sangat tergantung dari parameter proporsional, differensial dan integral.	Tidak disebutkan dalam penelitian namun kurang baik dibanding PID.	Aplikasi CMAC secara langsung tidak tersedia. Gabungan CMAC dg PID mengurangi <i>overshoot</i> dan mempercepat respon waktu.	Aplikasi ANN-RBF secara langsung tidak tersedia. Gabungan PID yang di-tune dengan RBF lebih baik dalam mengurangi <i>overshoot</i> dan mempercepat respon waktu dibanding kombinasi PID CMAC.
<b>Respon terhadap gangguan</b>	Dengan kondisi normal, kalah jika dibandingkan dengan gabungan PID dengan CMAC.	Lebih sensitif terhadap <i>noise</i> dibanding PID, sehingga mempengaruhi stabilitas pengontrolan <sup>(2)</sup> .	Lebih tahan terhadap gangguan dibandingkan PID <sup>(1)</sup>	Gabungannya dengan PID akan lebih tahan terhadap gangguan <sup>(2)</sup>
<b>Perhitungan</b>	Analisis numerik sederhana karena strukturnya juga yang sederhana, namun bisa merepresentasikan fenomena fisis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model matematika kontrol tidak diperlukan</li> <li>Semakin banyak variabel <i>input</i> semakin meningkatkan kompleksitas <i>membership rule table</i>.</li> <li><i>Tuning Fuzzy</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jaringan saraf tiruan, fenomena fisik tidak dapat direpresentasikan (<i>black box</i>).</li> <li>Terlalu banyak neuron akan memberatkan dan mempengaruhi perhitungan <sup>(8)</sup></li> <li>Akurasi tergantung data <i>look-up table</i> dan pembelajaran terhadapnya.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jaringan saraf tiruan, (<i>black box</i>).</li> <li>Kecepatan perhitungan sangat tergantung jumlah <i>layer</i>, jumlah neuron dan metode pelatihannya <sup>(8)</sup>.</li> <li>Kemampuan <i>self learning</i></li> </ul>
<b>Analisis Dinamika</b>	Sangat tergantung dari pengesetan parameter PID ( $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ )	Cenderung tidak stabil dan efek kontrol tidak sempurna pada pengontrolan <i>fuzzy</i> dua dimensi <sup>(8)</sup> .	Cocok untuk kondisi nonlinier, dinamis dan <i>real time</i> <sup>(8)</sup>	Dapat memecahkan kondisi nonlinear
<b>Aplikasi pada system endali <i>Water Level</i></b>	Sudah diaplikasikan pada reaktor PWR	Terbatas pada simulasi <sup>(8)</sup> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pengontrolan CMAC sangat baik apabila menambahkan PID <i>Controller</i> <sup>(10)</sup>.</li> <li>Sebatas simulasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sangat baik dengan menambahkan PID <i>Controller</i> <sup>(8)</sup></li> <li>Terbatas pada simulasi</li> </ul>

Hal ini memberikan efek yang lebih baik pada pengurangan *overshoot*  $\delta$  berkurang sebesar 1,4%, dan waktu untuk mencapai puncak pertama ( $T_s$ ) berkurang 53%, dan waktu penetapan (*settling time*). Disamping hasil yang cukup baik ini, satu hal lain yang patut menjadi perhatian dalam aplikasi kombinasi ini adalah munculnya *noise* karena fungsi derivatif PID dan korelasinya dengan metode *fuzzy*. Belum ada hasil penelitian yang menjelaskan secara detil tentang hal ini serta dampaknya bagi sistem keselamatan pada umumnya.

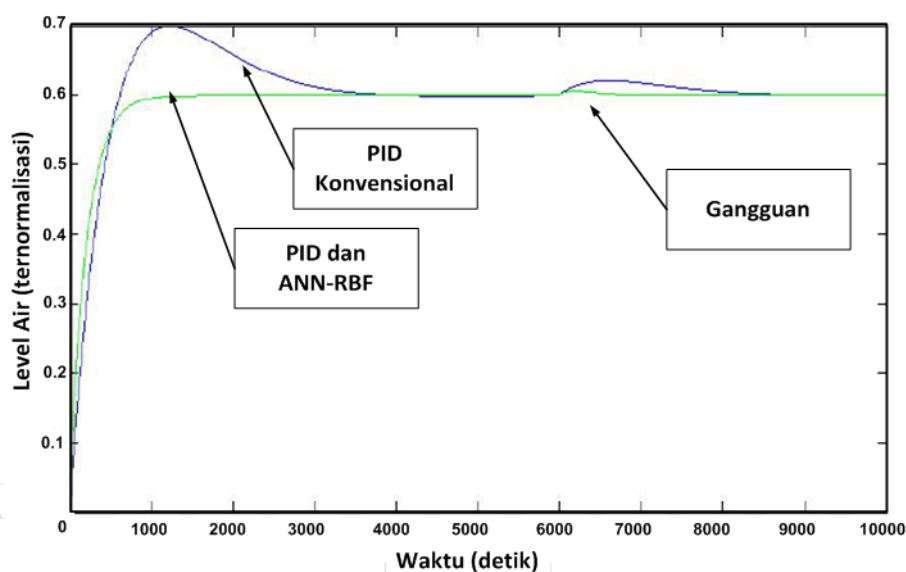
## KESIMPULAN

Dari kajian ini dapat disimpulkan bahwa meskipun PID membawa kelemahan karena karakteristiknya yang saling mempengaruhi antara parameter Proporsional, Integral dan Diferensialnya, namun karena sederhana akan lebih memudahkan dalam aplikasi sekaligus menjamin kehandalannya. Kelemahan ini bisa

diperbaiki dengan penambahan metode kecerdasan buatan terutama untuk menentukan parameter PID secara lebih akurat dan kontinyu. Akan tetapi penambahan ini harus dilakukan dengan hati-hati dan melibatkan riset yang mendalam, karena pengalaman menunjukkan, penambahan metode ini boleh jadi malah akan menurunkan performa PID seperti munculnya penambahan *noise*, lambatnya waktu naik karena ketidak mampuan sistem cerdas dalam merespon, atau detrimental faktor lainnya karena cacat bawaan dari metode kecerdasan buatan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Maloy, J. D, Bingham, B. E, *Control System and Methods for Pressurized Water Reactor (PWR) and PWR Systems Including Same*, Patent Application Publication No. US 012/0155594 A1, United States, Jun. 21, 2012.



Gambar 11. Hasil perbandingan respon metode PID konvensional serta gabungan PID dan ANN-RBF beserta kemampuannya mengatasi gangguannya.

2. Oka, Y., Suzuki, K., *Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control*, Springer, 2008.
3. Firmansyah, D.E., *PID*, <http://dhikblog.blogspot.com/2013/10/control-pid-proportional-integral.html>.
4. Ali, M., *Pembelajaran perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software MATLAB*, Jurnal Edukasi@Elektro Vol. 1, No. 1, , hlm. 1 – 8, Oktober 2004.
5. Chairuzzani, R., Ariyanto, M., *Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler pada PID*, <http://elektroindonesia.com>, edisi ke 12, Maret, 1998
6. Mustaghifiri, A., *Modul Proportional Integrator Diferensiator*, <http://blogevir.blogspot.com/2010/07/modul-proportional-integrator.html>
7. Nasution, H., *Implementasi Logika Fuzzy pada Sistem Kecerdasan Buatan*, Jurnal ELKHA Vol.4, No 2, Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak, Oktober 2012
8. Oliveira, M. V. , Almeida, J. C. S., *Application of artificial intelligence techniques in modeling and control of a nuclear power plant pressurizer system*, Divisão de Instrumentação e Confiabilidade Humana, Instituto de Engenharia Nuclear.
9. Wahyuni, D.A.S., *Pengertian Artificial Network*, <http://jaimelesstatistiques.blogspot.com/2011/01/pengertian-artificial-neural-network.html>
10. Jinming Y., et.al, *Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on CMAC and PID Controller*, Department of Electric Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China.
11. Jian-Hua Ye, Jin-Ming Yi, Hua-yan Ji, *Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on RBF Neural Network and PID Controller*, Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Qingdao, 11-14 July 2010.
12. Duo Zhang Guo, Hong Yang Xu, *Research on Pressurizer Water Level Control of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Station*, School of Electric and Automatic Engineering, Shanghai University of electric power, Shanghai, 2009.